

# 过氧化氢对尿液处理的稳定作用研究

胡松林, 高郁晨, 薛源, 何新星

中国航天员科研训练中心, 北京  
Email: husl06@sina.com

收稿日期: 2020年11月30日; 录用日期: 2020年12月24日; 发布日期: 2020年12月31日

## 摘要

从尿液回收水是解决长期载人航天任务中水需求和再补给挑战的途径之一, 尿液在收集和储存中需要控制微生物繁殖和保持化学稳定性。通过向新鲜尿液中添加过氧化氢及分析尿液储存过程中产生挥发性有机物结果表明: 过氧化氢能抑制尿素水解而稳定尿液, 也能减少尿液在处理过程中产生的挥发性有机物。这表明过氧化氢有可能成为航天任务中尿液回收稳定化处理的低风险化学品。

## 关键词

过氧化氢, 尿液预处理, 稳定作用, 挥发性有机物

# Research on Stabilization of Urine Treatment by Hydrogen Peroxide

Songlin Hu, Yuchen Gao, Yuan Xue, Xinxing He

China Astronaut Research and Training Center, Beijing  
Email: husl06@sina.com

Received: Nov. 30<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

Recovering water from urine is one of the ways to solve the challenges of water demand and re-supply in long-term manned space missions. It needs to control microbial reproduction and maintain chemical stability during urine collection and storage. By adding hydrogen peroxide to fresh urine and analyzing the volatile organic compounds produced in the urine storage process, the results show that hydrogen peroxide can inhibit the hydrolysis of urea and stabilize the urine, and it can also reduce the volatile organic compounds generated in the urine processing. This shows that hydrogen peroxide may become a low-risk chemical for urine recovery and treatment chemicals in long-term space missions.

## Keywords

### Hydrogen Peroxide, Urine Pretreatment, Stabilization, Volatile Organic Compounds

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

载人航天器舱内环境由环境控制和生命支持系统维持, 长期载人航天任务中从尿液回收水对生命支持系统水循环和再补给产生重大影响。尿液是航天器中水回收和管理系统的重要来源之一, 尿液是包含大量的无机物和有机物组成的水溶液, 其中含量较大的包括尿素、氯化钠、其他盐和各种酸, 这些物质能占尿液总重的 3%~4%(wt.) [1]。由于尿液富含有机物, 在收集存储时易发生微生物定殖, 导致尿素水解产生氨气和铵盐, 形成生物膜, 导致沉淀和结垢, 损害尿液收集存储处理设备和污染航天器舱内的大气环境。为了完成在太空的尿液回收, 必须通过添加预处理化学品来收集和稳定尿液, 达到控制尿液微生物繁殖和稳定尿液中化学物质的目的[2]。

目前, 在航天任务中使用的尿液预处理化学品是氧化杀菌剂和无机酸组合, 氧化性杀菌剂包括六价铬( $\text{CrO}_3$ )、次氯酸钠( $\text{NaOCl}$ )、碘化有机物和 Oxone [过氧单硫酸钾( $\text{KHSO}_5$ )、硫酸氢钾( $\text{KHSO}_4$ )和硫酸钾( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )的混合物]等, 而使用的无机酸包括浓硫酸、磷酸和盐酸等[2] [3] [4]。国际空间站上尿液预处理方式不尽相同, 俄罗斯舱段采用的是三氧化铬和浓硫酸组合; 而美国舱段采用的 Oxone 和浓硫酸组合, 均使用浓硫酸保证储存尿液呈酸性。虽然这些预处理方法是有效的, 但因其强氧化性, 引入强致癌性的六价铬及采用浓酸条件, 这使得尿液在处理时会产生有毒的挥发性有机物, 并对整个处理过程提出了多重密封要求[4]。于此, 寻找低风险低毒性的尿液预处理方式成了必然的需求。已有学者测试非氧化杀菌剂(季铵和苯甲酸钠)和有机酸组合在尿液处理中使用[4] [5]。基于过氧化氢产生羟基自由基的高级氧化技术广泛地应用于饮用水和有机废水等处理中[6], 对于有机污染物能够有效地降解, 最终生成水和二氧化碳[7]。

因此, 本研究开展过氧化氢处理尿液等实验, 研究过氧化氢在对尿液稳定化作用, 以及对过氧化氢在处理尿液过程中产生挥发性有机物的情况进行分析, 以探索适合于航天飞行任务中低毒性低风险尿液预处理化学品。

## 2. 方法

### 2.1. 仪器与试剂

本研究使用的仪器包括: 多参数水质分析仪(Multi 9630 IDS, WTW, 德国)、气相色谱质谱仪(GC7890/5977MSD, Agilent, 美国)和气体预浓缩仪(7200, Entech, 美国)。主要使用的化学试剂有三氧化铬(分析纯, 阿拉丁)、浓硫酸(98%, 国药集团)、过氧化氢(3%, 江西草珊瑚消毒用品有限公司)。

### 2.2. 过氧化氢尿液稳定实验

收集新鲜尿液 1 L, 分成 4 份, 每份 200 ml, 其中 3 份加入 10 ml 过氧化氢溶液(3%, 0.88 mol/L)作为实验组, 一份加入 10 ml 去离子水作为对照组, 对加入过氧化氢的尿液, 分别用 60%硫酸溶液调整溶液的 pH 值 $\leq 4$  和 $\leq 2$ , 使用多参数水质分析仪测定不同时间点的 pH 值、电导率和盐度。

### 2.3. 尿液处理过程中挥发性有机物分析

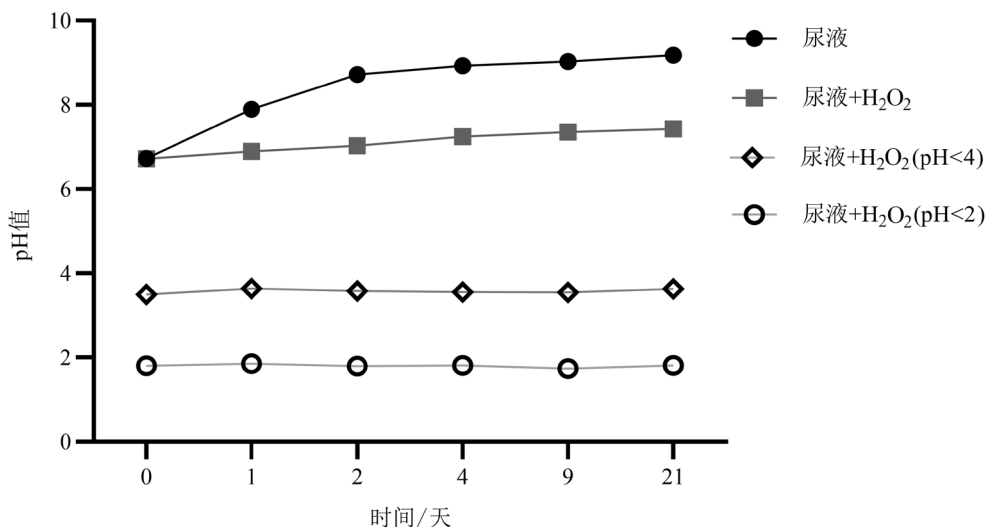
将 200 ml 过氧化氢、200 ml 过氧化氢(60%硫酸 20 ml)和 40 ml 三氧化铬(2%)硫酸溶液分别放入 4 L 尿液收集桶,尿液在 2 天内收集完成,在稳定处理 5 天后,分别取出 500 ml,放入吹洗瓶中,用适当流速的氦气将溶液中挥发性有机物吹扫出来,收集到 5 L 泰德拉气体采样袋中。同时吹扫 500 ml 新鲜尿液以收集气体到采样袋。然后,采用气体预浓缩仪-气相色谱质谱仪分析气样中的挥发性有机物成份。

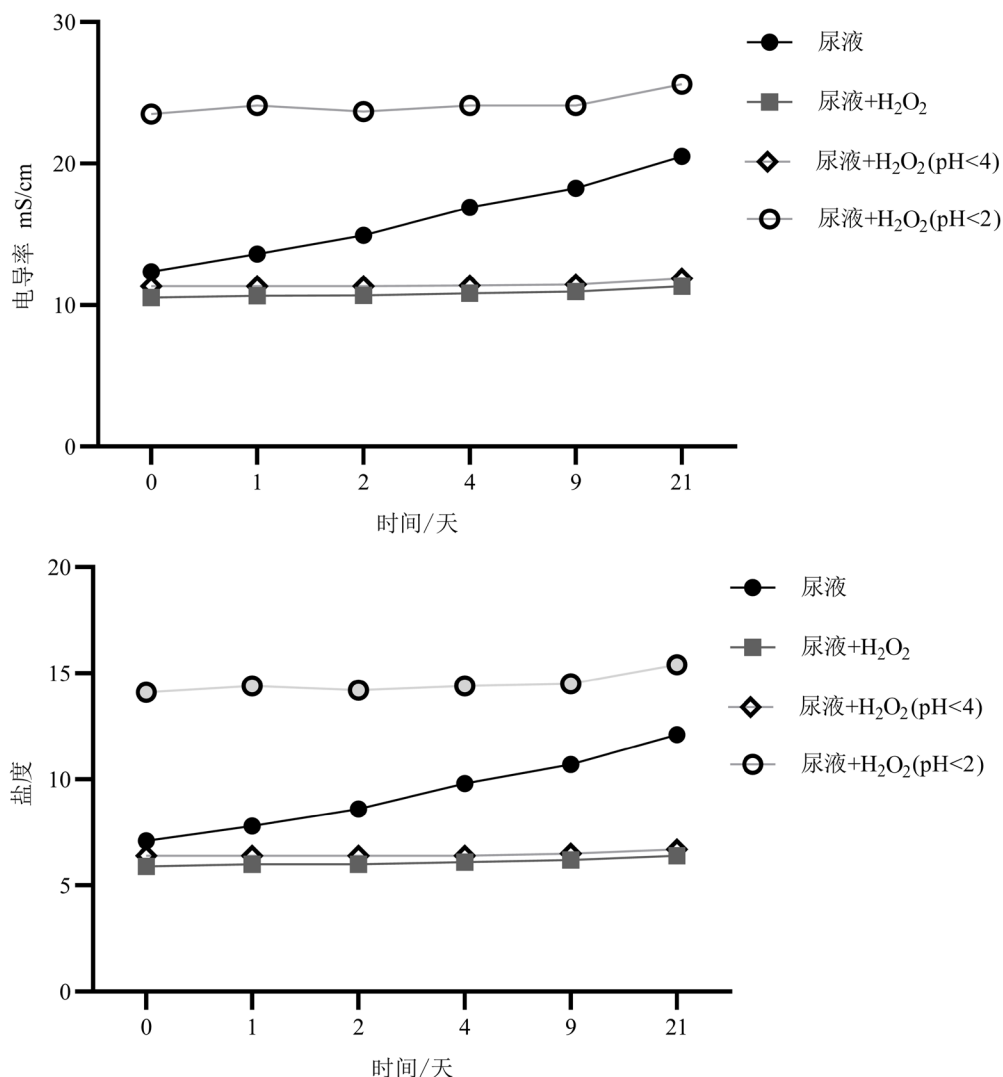
不同处理方式的尿液中挥发性有机物测试条件:设置气体预浓缩的进样量 200 ml,气相条件设定:色谱柱:Agilent DB-5MS, 60 m × 250 $\mu$ m × 1 $\mu$ m, 35 $^{\circ}$ C用于 6 min,然后 6 $^{\circ}$ C/min 到 140 $^{\circ}$ C用于 0 min,然后 15 $^{\circ}$ C/min 到 220 $^{\circ}$ C用于 5 min;质谱条件设定:传输线温度:250 $^{\circ}$ C,电子能量:70 eV,离子源温度:230 $^{\circ}$ C,四级杆温度:150 $^{\circ}$ C,扫描模式:Full Scan 模式。使用 Agilent MassHunter Qualitative Analysis 软件分析色谱总离子流图(TIC),获得各色谱峰面积,计算各色谱峰面积所占百分比。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 过氧化氢对尿液稳定的作用

在太空飞行中回收尿液中的水,用于饮用等目的,在尿液收集和处理过程时,需要控制微生物繁殖和尿液化学稳定性[2]。在非无菌环境或高温条件下(>40 $^{\circ}$ C)储存尿液,导致尿素水解成  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  和  $\text{CO}_2$ ,由于中性尿素转化为带电荷的化合物,导致溶液的 pH 值、电导率、渗透压升高,离子强度/带电物质增加,形成低溶解度的化合物并生成沉淀[8] [9] [10]。因此,可以用电导率和 pH 值随时间的变化来表征尿素水解,尿液中的电导率与氨浓度正相关,与尿素浓度负相关[10] [11]。本研究中使用电导率作为追踪尿素水解程度的指标。通过在不同的时间点测试对照组和实验组尿液 pH 值、电导率和盐度发现:对加入去离子水的对照组尿液的 pH 值、电导率和盐度显著地随着存储时间延长而增加,pH 值增加到 9.2 左右;加入过氧化氢的实验组中(过氧化氢浓度为 0.014%)的尿液 pH 值、电导率和盐度缓慢地增加,加入硫酸调整成不同 pH 值,酸化能抑制电导率和盐度增加,但是酸的加入能提高尿液中电导率和盐度基础值,见图 1。由于过氧化氢处理尿液时,会促使尿液中某些成份发生氧化反应(如含巯基化合物氧化成硫酸盐),导致尿液的 pH 值、电导率和盐度有所增加[12],但不明显。上述实验结果表明过氧化氢能够抑制尿素水解,从而稳定尿液的 pH 值、电导率和盐度,维持尿液中化学成份稳定性。在酸性条件下,过氧化氢抑制尿素水解作用更为明显。





**Figure 1.** Changes in pH, conductivity and salinity of urine treated with hydrogen peroxide over time  
**图 1.** 过氧化氢在尿液处理中 pH 值、电导率和盐度随时间变化

已有的研究表明：过氧化氢能附着在微生物的细胞壁、膜和酶转运系统上，导致细胞内成份氧化，因微生物修复能力过载而导致其死亡[13]；过氧化氢也能将脲酶上的巯基不可逆地氧化为亚磺酸或磺酸，破坏脲酶活性中心而导致完成失去酶活性[14]。这些可能是过氧化氢抑制尿素水解而稳定尿液的原因。

### 3.2. 过氧化氢对尿液处理中产生挥发性有机物的影响

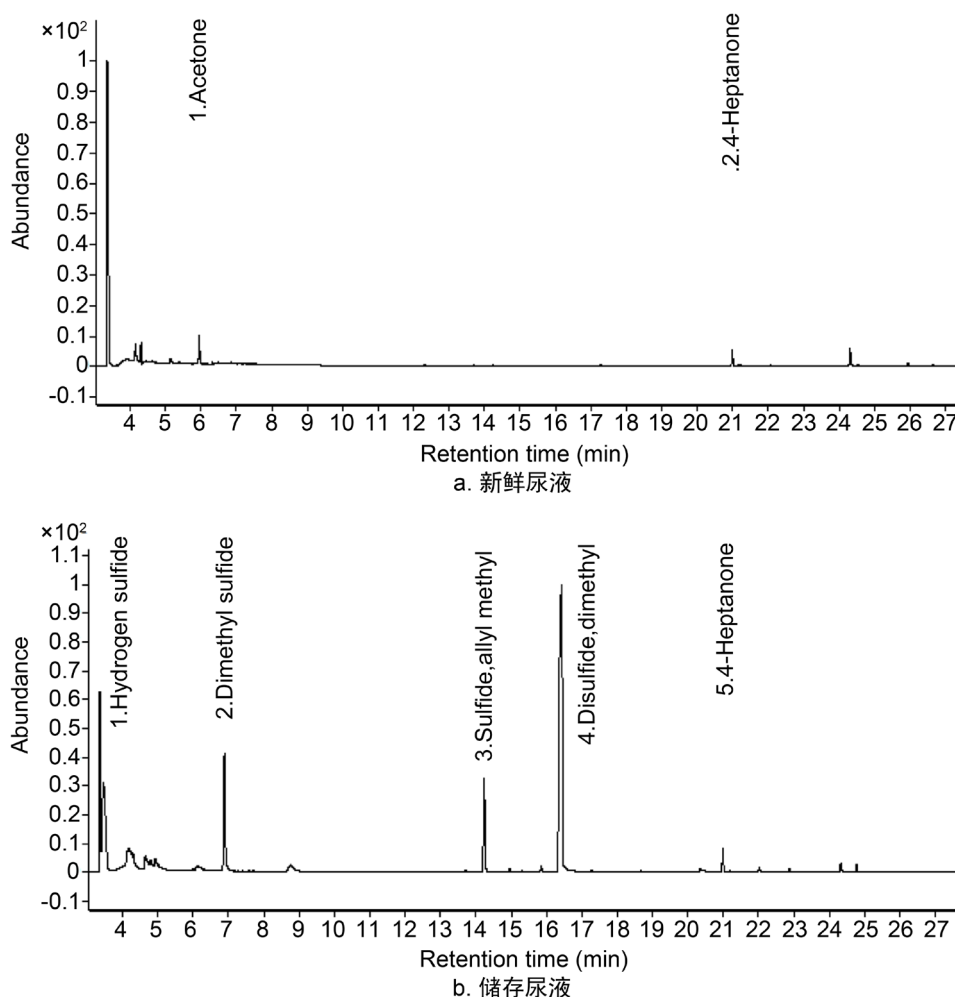
通过添加预处理化学品控制尿液在收集和储存时的微生物繁殖，防止尿素水解产生氨气，尿液在氧化性预处理剂作用下，将会引起尿液中有机物的降解和产生难闻的气体，这将导致航天器舱内空气环境恶化，引发威胁乘员生命健康的风险和增加生命支持保障系统的工作负荷。因此，在尿液预处理过程中要求产生的挥发性有机物和发泡最小化[4]。通过文中的实验发现：过氧化氢在中性或酸性条件下对尿液具有稳定作用。接下来将探究过氧化氢在稳定尿液时产生挥发性有机物状况。

通过气相色谱质谱法对新鲜尿液和储存尿液吹扫产生的气体进行分析发现：新鲜尿液中挥发性有机物较少，主要成份是甲醇、乙醇、丙酮和 4-庚酮等；而储存尿液在发生腐败的过程产生了中含有大量含

硫化物, 包括硫化氢、甲硫醇、二甲基硫和二甲基二硫等, 以及少量酮类化合物, 见表 1 和图 2 所示。这表明尿液在存储时发生微生物污染后, 尿素水解会导致尿液中的化合物发生改变, 除了产生氨外, 还会产生多种含硫的挥发性有机物而使尿液出现恶臭气味, 并形成絮状生物膜和沉淀。

**Table 1.** Details of GC-MS chromatography of fresh urine and stored urine (7 days) purged gas  
**表 1.** 新鲜尿液和储存尿液(7 天)吹扫气体 GC-MS 色谱图详细信息

类型	名称	CAS	色谱峰面积	色谱峰高	峰面积所占百分比
新鲜尿液	Methyl Alcohol	67-56-1	1,325,613.75	585,821.42	21.67%
	Ethanol	64-17-5	332,967.71	116,165.81	5.44%
	Acetone	67-64-1	2,044,051.16	923,125.00	33.42%
	2-Pentanone	107-87-9	84,934.12	36,060.46	1.39%
	Pyrrole	109-97-7	59,583.01	16,874.38	0.97%
	Hexanal	66-25-1	75,067.97	30,783.54	1.23%
	Ethylbenzene	100-41-4	70,159.58	30,875.32	1.15%
	4-Heptanone	123-19-3	987,274.77	464,013.88	16.14%
	Phenol	108-95-2	702,984.65	270,522.23	11.49%
	1,3-Cyclohexadiene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-	99-86-5	51,095.7	25,892.64	0.84%
	Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-	535-77-3	225,381.96	116,608.88	3.68%
	D-Limonene	5989-27-5	33,065.96	17,879.09	0.54%
	$\gamma$ -Terpinene	99-85-4	124,891.29	62,855.43	2.04%
	峰面积合计			6,117,071.63	
存储尿液 (7 天)	Hydrogen sulfide	7783-06-4	14,590,478.51	1,152,317.06	8.61%
	Methanethiol	74-93-1	4,108,146.46	697,466.76	2.43%
	Methylamine, N,N-dimethyl-	75-50-3	3,895,080.23	599,307.2	2.30%
	Acetone	67-64-1	2,673,033.29	243,421.8	1.58%
	Dimethyl sulfide	75-18-3	21,296,925.78	6,650,303.79	12.57%
	2-Pentanone	107-87-9	505,579.31	124,690.44	0.30%
	Sulfide, allyl methyl	10152-76-8	14,325,869.1	5,330,523.59	8.46%
	Propane, 1-(methylthio)-	3877-15-4	550,510.69	215,799.42	0.33%
	1-Propene, 1-(methylthio)-, (Z)-	52195-40-1	927,537.03	356,627.48	0.55%
	Disulfide, dimethyl	624-92-0	101,454,216.1	16,290,031.94	59.90%
	4-Heptanone	123-19-3	2,859,583.11	1,308,324.61	1.69%
	2,4-Dithiapentane	1618-26-4	748,630.17	251,029.29	0.44%
	Disulfide, methyl 2-propenyl	2179-58-0	455,319.47	198,880.26	0.27%
	Dimethyl trisulfide	3658-80-8	987,426.97	425,940.98	0.58%
峰面积合计			169,378,336.22		



**Figure 2.** Total ion chromatogram of volatile organic compounds in fresh urine and stored urine (7 days)  
**图 2.** 新鲜尿液和储存尿液(7 天)中挥发性有机物色谱质谱总离子流图

在本研究中使用三氧化铬(2%)硫酸溶液作为过氧化氢在尿液处理时产生挥发性有机物的参照物。经分析吹扫产出的气体发现：向尿液添加三氧化铬(2%)硫酸浓酸稳定 7 天后的尿液中含有易挥发的含硫化合物，包括硫化氢、羰基硫、甲硫醇和二甲基二硫等，以及酮类化合物如丙酮、2-戊酮和 4-庚酮等，也包括含氮化合物和烯烃等；过氧化氢在中性条件下处理尿液时产生挥发性有机物主要是含有酮类化合物如丙酮、2-戊酮和 4-庚酮等，而在酸性条件处理尿液时产生主要挥发性有机物是酮类化合物和呋喃衍生物等，见表 2 和图 3。

在酸性条件下，三氧化铬和过氧化氢都具有氧化性[4] [9] [11]，会与尿液中的有机物发生反应，生成挥发有机物。三氧化铬和硫酸组成的尿液处理试剂能将伯醇和仲醇分别转化为醛和酮，根据反应条件将醛转化为羧酸[15]；过氧化氢能与胺、羟胺、醇、酮、硫等化合物发生氧化作用，例如将醇转化成醛酮或者羧酸[12]。实验中三种尿液处理过程中产生挥发性有机物色谱峰面积之和大小关系如下：三氧化铬浓硫酸溶液 > 过氧化氢浓硫酸溶液 > 过氧化氢，但其挥发性有机物产生量均小于发生腐败的存储的水解尿液的。通过分析尿液处理过程中的挥发性有机物发现：新鲜尿液在储存时发生尿素水解过程中会产物大量的含硫化合物(如硫化氢等)，占比达到所有挥发性有机物的 93.7%，三氧化铬能将尿液中醇类氧化成酮类化合物，占比为 34.38%，但产生了很多含硫化合物(如硫化氢、甲硫醇)，占比为

39.03%；过氧化氢在中性和酸性条件下处理尿液将不会产生挥发性含硫化合物，以产生酮类化合物为主，分别占比为 79.44%和 57.77%。由于过氧化氢在处理尿液时，提供了羟自由基，其氧化过程具有选择性弱、反应速率快和氧化产物复杂等特点，主要通过双键加成、脱氢反应和电子转移三种类型降解有机污染物[7] [12]。与三氧化铬处理尿液相比，过氧化氢能将尿液中的含硫化合物转化成硫酸盐，减少含硫的恶臭气体[7] [12]。过氧化氢还可以与尿素形成络合物，其氧化性具有选择性，也起到了稳定尿液的作用[16]。

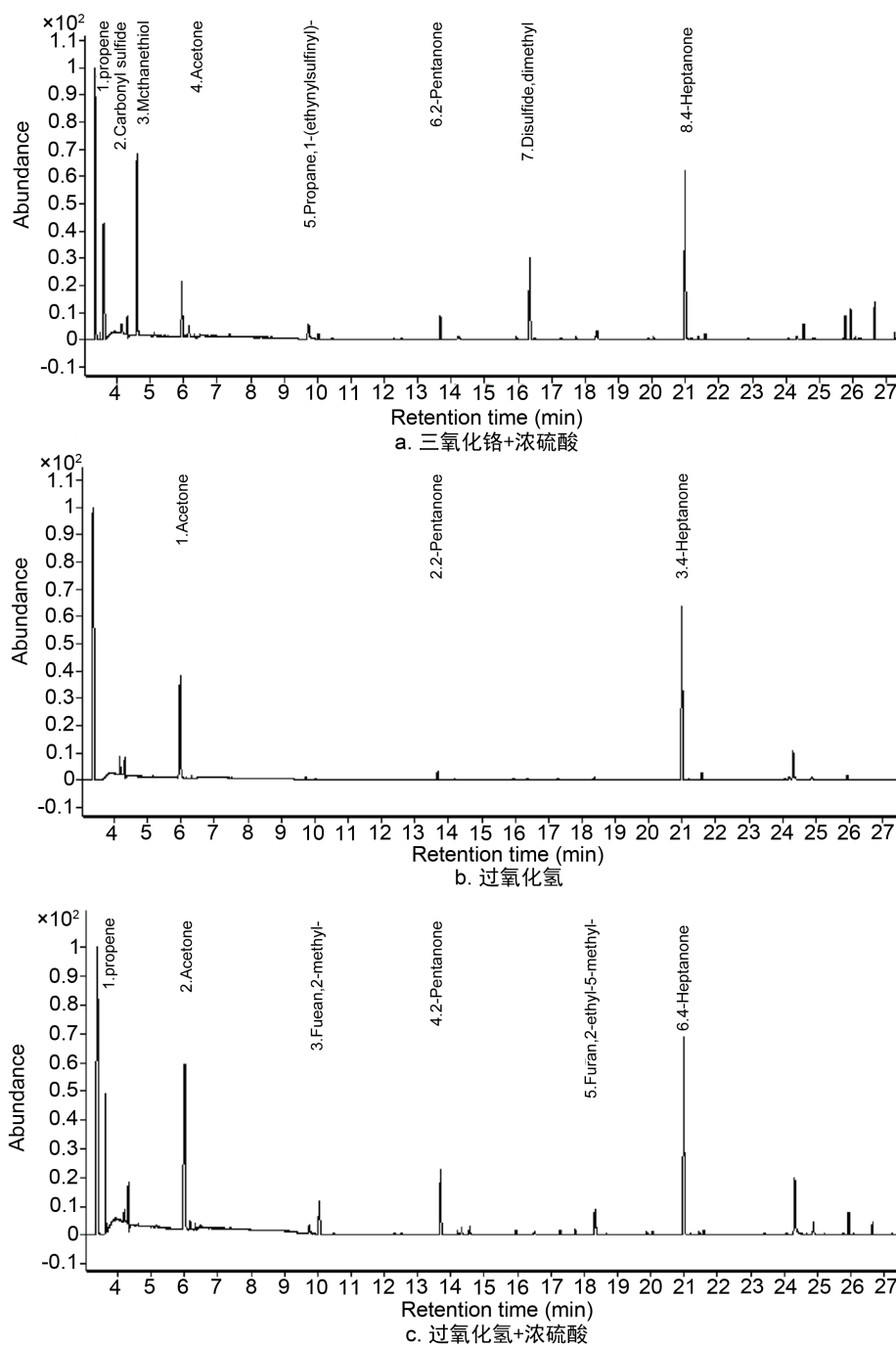
**Table 2.** Details of GC-MS chromatography of three pretreatment process for urine purged gas  
**表 2.** 三种尿液预处理过程中吹扫气体 GC-MS 色谱图详细信息

类型	名称	CAS	色谱峰面积	色谱峰高	峰面积所占百分比%
三氧化铬 (硫酸)	Hydrogen sulfide	7783-06-4	393,262.73	334,344.27	0.42%
	Propene	115-07-1	6,476,500.63	5,242,847.07	6.85%
	Carbonyl sulfide	463-58-1	3,783,832.55	3,061,539.97	4.00%
	Methanethiol	74-93-1	18,765,738.81	8,391,208.44	19.85%
	Acetone	67-64-1	6,165,846.36	2,747,602.24	6.52%
	Furan	110-00-9	1,182,699.73	589,383.47	1.25%
	Allyl chloride	107-05-1	330,287.31	157,734.93	0.35%
	Propane, 1-(ethynylsulfinyl)-	121564-27-0	2,970,978.51	999,785.47	3.14%
	Furan, 2-methyl-	534-22-5	496,718.48	240,158.37	0.53%
	Propyl mercaptan	107-03-9	255,761.37	106,457.63	0.27%
	2-Butanone, 3-methyl-	563-80-4	268,365.97	109,498.87	0.28%
	2-Pentanone	107-87-9	2,980,904.78	1,285,210.7	3.15%
	Methyl Isobutyl Ketone	108-10-1	406,312.18	179,675.09	0.43%
	Disulfide, dimethyl	624-92-0	10,251,405.8	4,348,237.43	10.85%
	2-Pentanone, 3-methyl-	565-61-7	305,625.59	123,918.72	0.32%
	3-Hexanone	589-38-8	442,418	203,492	0.47%
	Furan, 2-ethyl-5-methyl-	1703-52-2	374,239.89	240,578.26	0.40%
	Hexanal	66-25-1	1,291,131.47	533,090.62	1.37%
	3-Pentanone, 2,2-dimethyl-	564-04-5	337,151.42	150,340.87	0.36%
	2-Hexanone, 3-methyl-	2550-21-2	535,140.55	207,481.95	0.57%
	4-Heptanone	123-19-3	21,595,965.91	8,632,324.01	22.85%
	Allyl Isothiocyanate	57-06-7	462,469.26	226,530.5	0.49%
	Disulfide, methyl 2-propenyl	2179-58-0	265,239.01	116,125.76	0.28%
	2H-Pyran,2-ethenyltetrahydro-2,6,6 trimethyl-	7392-19-0	2,463,241.4	924,413.1	2.61%
	1,3-Cyclohexadiene,1-methyl-4-(1-methylethyl)-	99-86-5	2,814,841.49	1,386,869.03	2.98%
	Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-	535-77-3	3,352,128.25	1,768,625.8	3.55%
	D-Limonene	5989-27-5	368,906.5	211,601.95	0.39%
	3-Carene	13466-78-9	245,223.71	143,539.63	0.26%
	γ-Terpinene	99-85-4	3,470,476.15	2,097,754.45	3.67%

## Continued

三氧化铬 (硫酸)	Cyclohexene,1-methyl-4-(1-methylethylidene)-	586-62-9	631,244.7	392,681.37	0.67%	
	Ionone	8013-90-9	834,753.68	481,176.15	0.88%	
峰面积合计			94,518,812.19			
	Methyl Alcohol	67-56-1	1,160,110.07	557,366.61	3.10%	
	Acetone	67-64-1	11,166,420.45	4,199,217.16	29.88%	
	2-Butanone	78-93-3	214,161.13	93,888.67	0.57%	
	Furan, 2-methyl-	534-22-5	110,577.49	49,327.12	0.30%	
	2-Pentanone	107-87-9	815,983.46	350,258.83	2.18%	
	Pentanal	110-62-3	114,135.23	49,369.8	0.31%	
	过氧化氢	Furan, 2-ethyl-	3208-16-0	64,294.38	28,794.37	0.17%
		1H-Pyrrole, 1-methyl-	96-54-8	180,920	71,211.28	0.48%
		Pyrrole	109-97-7	180,513.58	68,238.04	0.48%
		Cyclohexanol, 3,3-dimethyl-	767-12-4	378,006.9	114,876.27	1.01%
	4-Heptanone	123-19-3	17,491,758.17	7,175,836.31	46.81%	
	2,4-Nonadienal, (E,E)-	5910-87-2	703,358.7	155,604.85	1.88%	
	Benzene, pentyl-	538-68-1	481,235.28	266,600.67	1.29%	
峰面积合计			33,061,474.84			
	Propene	115-07-1	6,515,241.39	5,436,438.74	9.37%	
	Methyl Alcohol	67-56-1	1,008,868.85	544,989.03	1.45%	
	Acetone	67-64-1	19,897,553.86	6,618,751.05	28.60%	
	Furan	110-00-9	717,681.19	308,948.11	1.03%	
	2-Butanone	78-93-3	741,527.1	334,308.94	1.07%	
	Furan, 2-methyl-	534-22-5	2,852,961.62	1,183,397.26	4.10%	
	2-Pentanone	107-87-9	5,532,642.08	2,333,707.24	7.95%	
	Pentanal	110-62-3	290,882.46	135,236.52	0.42%	
		Furan, 2-ethyl-	3208-16-0	499,015.94	236,972.34	0.72%
	过氧化氢 (硫酸)	Furan, 2,5-dimethyl-	625-86-5	603,064.28	294,221.73	0.87%
Methyl Isobutyl Ketone		108-10-1	334,359.9	140,780.2	0.48%	
2-Pentanone, 3-methyl-		565-61-7	257,831.9	111,776.99	0.37%	
3-Hexanone		589-38-8	483,810.78	221,705.03	0.70%	
Furan, 2-ethyl-5-methyl-		1703-52-2	2,389,682.82	887,701.08	3.44%	
2-Hexanone, 3-methyl-		2550-21-2	336,334.78	120,177.66	0.48%	
4-Heptanone		123-19-3	18,623,119.39	7,830,059.76	26.77%	
Phenol		108-95-2	5,390,207.69	1,977,820.44	7.75%	
Furan, 2-pentyl-		3777-69-3	842,574.82	480,200.34	1.21%	
		o-Cymene	527-84-4	1,473,654.02	848,144.25	2.12%
	$\gamma$ -Terpinene	99-85-4	773,853.7	482,517.9	1.11%	
峰面积合计			69,564,868.57			





**Figure 3.** Total ion chromatogram of volatile organic compounds in urine with different pretreatment agents  
**图 3.** 不同预处理剂尿液中挥发性有机物色谱质谱总离子流图

通过上述实验揭示：向尿液加入过氧化氢能够抑制尿素水解，并在尿液处理过程中不会产物挥发性含硫化合物。尽管尿液含有有机物种类多，化学成份复杂，通过过氧化氢处理，可以将其中的无机物和有机物氧化并消除气味，降低毒性并提高可降解性，以及控制微生物生长等作用，使用时不存在像其他氧化剂存在化学残留物等问题[17]。过氧化氢与水互溶，其使用安全性与其浓度有关，通过本实验研究使用极低浓度的过氧化氢可以控制尿液中微生物繁殖和抑制尿素水解，达到稳定尿液的目的。但是由于太

空收集的机组人员尿液具有较高的钙浓度[18], 会给尿液处理化学品的适用性带来新的挑战, 需要对此做进一步的研究。

#### 4. 结论

这项研究提供的数据表明: 0.014%过氧化氢可以抑制尿素水解, 从而稳定尿液, 在酸性条件下, 过氧化氢对尿液的稳定作用会增强。向尿液添加过氧化氢会降低尿液在存储处理过程中产生的挥发性有机物, 特别是含硫化合物, 降低了恶臭气味。因此, 可以得出结论: 过氧化氢可以在中性或酸性条件下稳定尿液, 并能够减少尿液在存储过程中产生的挥发性有机物, 是一种符合低风险低毒性的尿液预处理化学品。

#### 致 谢

感谢实验室各位老师及同事辛勤地付出。

#### 基金项目

本研究课题受到 SYFDZZ18000041 项目资助。

#### 参考文献

- [1] Hutchens, C. and Rethke, D. (1995) Urine Pretreatment Methods and Testing for Micro-Gravity Application. *SAE Transactions*, **104**, 816-820. <https://doi.org/10.4271/951585>
- [2] Guest, S.S., Thompson, M.S. and Camacho, J.G. (2008) Urine Pretreatment in Advanced Water Recovery Systems for Human Space Exploration. In: *Earth Space*, American Society of Civil Engineers, Long Beach, 1-8. [https://doi.org/10.1061/40988\(323\)98](https://doi.org/10.1061/40988(323)98)
- [3] Howard, S. and Miernik, J. (1991) An Analysis of Urine Pretreatment Methods for Use on Space Station Freedom. SAE Technical Paper 911549. <https://doi.org/10.4271/911549>
- [4] Williams, T., Akse, J., Hadley, N., Dahl, R. and Glock, D. (2011) Nonhazardous Urine Pretreatment Method for Future Exploration Systems. *41st International Conference on Environmental Systems*, Portland, July 2011, 17-21. <https://doi.org/10.2514/6.2011-5074>
- [5] Adams, N., Mitchell, J. and Pickering, K. (2012) Development of Low-Toxicity Urine Stabilization for Spacecraft Water Recovery Systems. *International Conference on Environmental Systems (ICES)*, Vail, 14-18.
- [6] Sanches, S., Barreto Crespo, M.T. and Pereira, V.J. (2010) Drinking Water Treatment of Priority Pesticides Using Low Pressure UV Photolysis and Advanced Oxidation Processes. *Water Research*, **44**, 1809-1818. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.001>
- [7] 江桂斌, 刘维屏. 环境化学前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 479-478.
- [8] Udert, K.M., Larsen, T.A. and Gujer, W. (2003) Biologically Induced Precipitation in Urine-Collecting Systems. *Water Science & Technology Water Supply*, **3**, 71-78. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0010>
- [9] Randall, D.G., Krähenbühl, M., Köpping, I., et al. (2016) A Novel Approach for Stabilizing Fresh Urine by Calcium Hydroxide Addition. *Water Research*, **95**, 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.007>
- [10] Ray, H., Saetta, D. and Boyer, T.H. (2018) Characterization of Urea Hydrolysis in Fresh Human Urine and Inhibition by Chemical Addition. *Environmental Science: Water Research & Technology*, **4**, 87-98. <https://doi.org/10.1039/C7EW00271H>
- [11] Udert, K.M., Larsen, T.A., Biebow, M. and Gujer, W. (2003) Urea Hydrolysis and Precipitation Dynamics in a Urine-Collecting System. *Water Research*, **37**, 2571-2582. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00065-4)
- [12] Nyamunda, B., Chigondo, F., Moyo, et al. (2013) Hydrogen Peroxide as an Oxidant for Organic Reactions. *Journal of Atoms and Molecules*, **3**, 23-44.
- [13] Ksibi, M. (2006) Chemical Oxidation with Hydrogen Peroxide for Domestic Wastewater Treatment. *The Chemical Engineering Journal*, **119**, 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.03.022>
- [14] Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Y., Chen, S. and Mahmood, I.B. (2013) Stabilization of Source-Separated Human Urine by Chemical Oxidation. *Water Science and Technology*, **67**, 1901-1907. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.055>

- [15] Li, J.J. (2009) Name Reactions. 4th Edition, Springer-Verlag, Berlin, 304-305.
- [16] Taliany, S. (2005) Urea-Hydrogen Peroxide Complex. *Synlett*, No. 12, 1962-1963. <https://doi.org/10.1055/s-2005-871968>
- [17] Deng, Y. and Zhao, R. (2015) Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, **1**, 167-176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- [18] Volpin, F., Badeti, U., Wang, C., *et al.* (2020) Urine Treatment on the International Space Station: Current Practice and Novel Approaches. *Membranes*, **10**, 327. <https://doi.org/10.3390/membranes10110327>